


## L'energia nuclear: pot resoldre el problema de l'escalfament global?

View metadata, citation and similar papers at [core.ac.uk](https://core.ac.uk)

brought to you by  CORE

provided by UPComr

Sovint es diu que l'energia nuclear pot ser la solució pel problema de l'escalfament global: l'article presenta dades i raonaments per concloure que, si tota l'electricitat mundial fos d'origen nuclear, l'escalfament global es reduiria tan sols en un 12%. També s'analitzen els subproductes militars de la indústria de l'energia nuclear "civil" i la problemàtica dels residus radioactius de l'energia nuclear de fissió. També s'analitza l'alt grau de dificultats que presenta l'energia nuclear de fusió de la que no hi ha encara seguretat que pugui ser utilitzada en l'àmbit "civil", tot i que ja ho és en l'àmbit militar.

\* \* \*

A menudo se dice que la energía nuclear puede ser la solución al problema del calentamiento global: el artículo presenta datos y razonamientos para concluir que, si toda la electricidad mundial fuese de origen nuclear, el calentamiento global se reduciría tan solo en un 12%. También se analizan los subproductos militares de la industria de la energía nuclear "civil" y la problemática de los residuos radioactivos de la energía nuclear de fisión. También se analiza el alto grado de dificultades que presenta la energía nuclear de fusión de la que no hay todavía seguridad de que pueda ser utilizada en el ámbito "civil", aunque ya lo sea en el ámbito militar.

\* \* \*

It is often said that nuclear energy could be the solution to the problem of global warming. This article presents data and arguments to show that if all of the electricity worldwide was provided by nuclear energy, global warming would only decrease by 12%. In addition, the military byproducts of the "civil" nuclear energy industry are analysed. The problem of radioactive waste from nuclear fission energy is examined, as are the serious difficulties presented by nuclear fusion energy. There are still no guarantees that nuclear fusion can be safely used in the "civil" sector, even though it is already used in the military sector.



## **L'energia nuclear: pot resoldre el problema de l'escalfament global?**

Josep Puig

*Doctor en Enginyeria Industrial*

*Professor a la UAB (ICTA – Institut de Ciència i Tecnologia Ambiental)*

*Membre del GCTPFNN – Grup de Científics*

*i Tècnics per un Futur No Nuclear*

El canvi climàtic és, de lluny, el problema més seriós de vulnerabilitat pel que fa al sistema energètic vigent al nostre món. Tot i les incerteses, hi ha motius suficients per exigir accions immediates de precaució, molt més agosarades que no pas les que fixa el Protocol de Kyoto, avui en vigor.

A les darreres dècades s'han desenvolupat incomptables tecnologies energètiques que permeten captar els fluxos d'energia que hi ha a la biosfera, empesos bàsicament per la radiació solar que el nostre planeta recull, en el seu viatge entorn el Sol, i per les forces d'atracció generades pel cossos celestes. Aquests fluxos són lliures de carboni fòssil i es presenten en quantitats més que suficients per poder cobrir les necessitats d'energia presents i futures. A més a més, el present sistema energètic industrialista és enormement ineficient (tant en les tecnologies de subministrament com en les tecnologies d'ús final), cosa que fa que hi hagi enormes oportunitats de millorar-ne el seu funcionament. L'estalvi d'energia generat pel seu ús eficient és la font d'energia més important que els humans tenim a l'abast.

Comparativament, generar electricitat mitjançant la fissió de l'àtom d'Urani-235 emet menys  $\text{CO}_2$  que no pas si es fa amb combustibles fòssils. Tot i que hi ha autors que consideren que si es té en compte tot el cicle del combustible nuclear i s'aplica a la nuclear la metodologia de valoració del cicle de vida, aleshores la diferència ja no és pas tant significativa. Fins i tot quan la llei del mineral d'urani, davalla per dessota d'un determinat llindar, les emissions de  $\text{CO}_2$  podrien ser comparables a les de les centrals tèrmiques de cicle combinat de gas.

Per fer front al greu problema de l'escalfament de l'atmosfera hi ha qui ha arribat a creure que la introducció massiva de l'energia nuclear pot resoldre el problema de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

De fet, la consideració pràctica més important, que mai no es posa sobre la taula, és: quantes centrals nuclears s'haurien de construir per què impactessin de forma considerable en les emissions de  $\text{CO}_2$  procedents de les centrals tèrmiques de combustibles fòssils?

L'energia nuclear és una font d'energia que es basa en la fissió d'un isòtop de l'urani, l'Urani-235, del qual només un 0,711% es troba en l'urani natural (el 99,28% de l'urani natural és U-238, que no és pas fissionable). A més a més, els minerals d'urani que avui s'exploten tenen un contingut d'entre 0,2% i 0,003% d'urani, cosa que fa que s'hagi de sotmetre a un procés de concentració (fàbriques de concentrats de mineral d'urani), en el qual es generen (en quantitats ingents) els anomenats estèrils de la mineria d'urani que contenen el 85% de la radioactivitat original del mineral. Aquest procés és un procés molt contaminant, tot i que ben desconegut per a la opinió pública.

De fet, la realitat ha demostrat que l'energia nuclear no ha pas passat la prova del mercat, ja que arreu on hi ha un mercat d'energia, més o menys lliure, la nuclear ha hagut de ser tractada amb tota mena de privilegis i tractes de favor per fer que continués generant electricitat, ja que el kWh generat amb reactors nuclears ha demostrat no ser competitiu amb altres formes de generació.

Els qui proposen l'energia nuclear per cobrir les necessitats energètiques del món obliden que l'energia nuclear produeix únicament energia elèctrica, i l'electricitat és només una part de l'energia consumida al món. Avui l'energia nuclear representa una minsa part del subministrament d'energia primària al món i el 17,1% de la generació d'electricitat.

El Consum d'Energia Primària (CEP) al món va ser, l'any 2003, de 10.224 Mtep (milions de tones equivalents de petroli). Les estadístiques oficials diuen que l'aportació nuclear al CEP va ser del 6,1% (624,3 Mtep) l'any 2003. Però si observem l'energia elèctrica que l'any 2003 va aportar la fissió nuclear, veurem que els reactors nuclears en funcionament varen generar 2.758,4 TWh (1 TeraWatt-hora = mil milions de kWh) d'electricitat, que és la única forma d'energia útil que aporta la fissió de l'àtom d'U-235. Si es fa la transformació d'energia elèctrica a energia tèrmica (a raó de 860 kcal/kWh), s'obté que els 2.758,4 TWh equivalen a 237,2 Mtep, una xifra que comparada amb els 624,3 Mtep que es llegeixen a les estadístiques oficials, és 2,6 vegades més petita. Per tant, la real aportació energètica útil de la nuclear seria del 2,3% i no del 6,1%, com s'afirma en base a les estadístiques energètiques dels organismes oficials.

La raó d'aquesta descarada manipulació estadística rau en el fet que quan transformen l'electricitat nuclear en energia tèrmica, no empren el factor de conversió de 860 kcal/kWh (que és l'energia tèrmica que s'obté a partir d'1 kWh d'electricitat) sinó que fan servir un factor ben superior fins i tot a 2.500 kcal/kWh, com si l'electricitat s'hagués generat en una central tèrmica de combustibles fòssils, on a la caldera cal cremar una quantitat de combustible que doni unes 2.500 kcal, que són les necessàries per produir 1 kWh d'electricitat

amb la transformació vapor-turbina-generator. Fer servir aquest factor de conversió té la seva raó de ser quan es crema un combustible fòssil, ja que s'hauran consumit les corresponents tones físiques de petroli o carbó (tep o tec), cosa que no passa en el nucli d'un reactor nuclear, on la calor es genera mitjançant la fissió dels nuclis dels àtoms d'un isòtop de l'urani: l'Urani 235.

En moltes estadístiques energètiques ocorre aquest fet ben simptomàtic. Quan es comptabilitza l'aportació de l'electricitat en el consum d'energia primària, es tracta l'electricitat nuclear i la generada amb les fonts d'energia renovable amb criteris diferents. Això fa que en surti afavorida la nuclear i penalitzades totes les renovables. A moltes estadístiques energètiques es fa trampa, fent que sembli que l'electricitat nuclear té un paper més important del que realment té, o fent que l'electricitat renovable tingui menys importància de la que realment té, ja que a l'electricitat d'origen renovable se li aplica el factor de conversió 860 kcal/kWh i no pas el que s'aplica a l'electricitat nuclear (2.500 kcal/kWh)

Vegem, però, quin paper podria tenir l'energia nuclear en la reducció de les emissions de CO<sub>2</sub>. Avui només un 17% de l'electricitat generada al món és d'origen nuclear. La indústria elèctrica és responsable del 25% del consum de combustibles fòssils. El consum de combustibles fòssils és responsable de les 2/3 parts de les emissions de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. El CO<sub>2</sub> és responsable en un 50% de l'escalfament global. Fins i tot, si tota l'electricitat mundial d'origen fòssil fos generada amb centrals nuclears, la reducció de l'escalfament global no arribaria al 12%. I això voldria dir construir 1.424 centrals nuclears d'1 GW de potència cadascuna.

Per poder disposar del combustible necessari per fer funcionar aquests 1.424 reactors, caldria haver de minar 370 milions de tones de mineral d'urani, per obtenir 271.000 tones de pastís groc o òxid d'urani (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) mitjançant les fàbriques de concentració del mineral d'urani (que generarien més de 640 milions de tones de residus líquids i més de 425 milions de tones de residus sòlids que contindrien el 85% de la radioactivitat original del mineral, i que restarien abandonats per segles en els apilonaments d'estèrils a peu de fàbrica). El pastís groc és la base per a la fabricació del combustible nuclear, després del seu enriquiment en l'isòtop U-235. Aquest procés generaria quantitats ingents de l'anomenat urani empobrit, que ja avui és emprat per la indústria d'armament com a cobriment de projectils i bombes (el que els hi dona un gran poder de penetració). El combustible gastat, després de ser sotmès al procés de fissió dins del nucli del reactor (més de 35.600 tones) contindria 285 tones de plutoni, amb el que es podrien fabricar 28.550 bombes atòmiques, si aquest material fissionable és extret en les fàbriques de reprocessament del

combustible gastat, en un procés altament contaminant, des del punt de mira radiològic. En el cas que el combustible gastat no es reprocessi, aleshores el plutoni roman contingut dins les barres del combustible. En aquest cas, s'haurà de gestionar aquest producte radioactiu durant 500.000 anys (el període de semidesintegració del plutoni és 24.300 anys, això vol dir que després d'aquest període de temps la seva radioactivitat haurà disminuït a la meitat. Per a què un producte radioactiu deixi de ser danyí per a l'entorn, cal que passin 20 períodes de semidesintegració. Pel plutoni això vol dir gairebé mig milió d'anys o 16.666 generacions humanes).

Un recent estudi del IEER (The Institute for Energy and Environmental Research) ha anat més enllà del que s'acaba d'exposar. L'estudi compara dos escenaris representatius d'una futura expansió de l'energia nuclear a escala mundial (en ambdós escenaris es considera que l'increment del consum d'electricitat és del 2,1 % anual).

El primer escenari, anomenat de 'creixement global' es basa en les dades del MIT (Massachusetts Institute of Technology) i suposa que al món hi pot haver una potència instal·lada nuclear de 1.000 GW l'any 2050. Com que tots els reactors avui en funcionament al món hauran tancat l'any 2050, això vol dir un increment net de l'ordre de tres vegades la potència nuclear avui instal·lada al món. Per donar un ordre de magnitud, aquesta proposta del MIT significaria que hauria d'entrar en funcionament un nou reactor nuclear cada 15 dies, de mitjana, entre l'any 2010 i l'any 2050. Tot i aquest increment de potència nuclear, la proporció d'electricitat nuclear al món només passaria del 16% al 20%. Per tant, la generació d'electricitat amb combustibles fòssils també hauria de créixer i, com a conseqüència, també creixerien les emissions de CO<sub>2</sub>.

El segon escenari, aquest elaborat per l'IEER i anomenat de 'creixement constant', estima el nombre de reactors que serien necessaris per mantenir les emissions de CO<sub>2</sub> al mateix nivell que les de l'any 2000. Considerant que les renovables i les centrals de gas també col·laboraran en la reducció de les emissions, troba que seria necessària una potència instal·lada nuclear d'entre 1.900 i 3.300 GW. Fent servir un valor promig, 2.500 GW, es conclou que l'energia nuclear al món representaria un percentatge igual al que avui té als EUA. I això voldria dir que s'hauria de començar a construir un reactor nuclear cada setmana o menys.

Voler confiar en l'energia nuclear per combatre l'escalfament global del planeta degut a la crema dels combustibles fòssils, a part de no resoldre el problema, significaria posar el món per un camí amb un enorme risc de proliferació nuclear i per un camí amb uns enormes costos econòmics, a més a més de

costos ecològics i socials. Avui ja es fa difícil controlar el risc de proliferació nuclear amb 437 reactors nuclears funcionant al món. Què podria passar si en funcionessin entre 1.000 i 3.300?

Les vies de proliferació nuclear són dues: l'enriquiment de l'urani i el reprocessament del combustible gastat.

Els reactors d'aigua lleugera (siguin d'aigua a pressió o a ebullició) requereixen urani lleugerament enriquit en el seu isòtop U-235 (entre el 3 i el 5%). Les tecnologies d'enriquiment són bàsicament dues: la difusió gasosa (molt intensiva en energia elèctrica) i la centrifugació (requereix de 50 a 60 vegades menys d'energia elèctrica que la difusió gasosa), tot i que n'hi ha d'altres (separació electromagnètica, aerodinàmica, química, làser). Els cinc estats, membres del Tractat de No Proliferació, que posseeixen armes nuclears, disposen de plantes d'enriquiment que han servit tant per enriquir l'urani per a combustible de reactors com per enriquir-lo (al 90%) per a armament nuclear. La bomba atòmica que va fer explotar el govern de Pakistan, l'any 1998, era d'urani enriquit en un centre militar clandestí, el qual emprava tecnologia comercial d'enriquiment procedent de l'empresa d'enriquiment europea Urenco.

Hi ha tres consideracions a fer pel que fa a l'expansió de les tecnologies d'enriquiment: la primera, quan es desvia urani enriquit cap a bombes a partir d'instal·lacions destinades a ús civil (és el cas del programa d'armament nuclear a Sudàfrica). La segona, quan es construeixen instal·lacions d'enriquiment clandestines dedicades específicament a finalitats militars a partir de tecnologies d'enriquiment desenvolupades per a aplicacions civils (el programa d'armes nuclears de Pakistan n'és l'exemple). I tercera, quan s'emmagatzemen quantitats d'urani lleugerament enriquit i hi ha instal·lacions d'enriquiment comercials, tot plegat permet disposar d'urani altament enriquit en un espai de temps relativament reduït (de moment, cap país ha dut a terme aquesta via, tot i que és només qüestió de temps, ja que per disposar d'1 kg d'urani altament enriquit es necessiten entre 176 i 219 kg d'urani natural, però solament entre 26 i 27 kg d'urani lleugerament enriquit).

Fa més de 30 anys, el U.S. Congressional Office of Technological Assessment va deixar escrit: 'Qualsevol planta d'enriquiment pot ser emprada, en teoria, per a la producció de material per a armament, mentre és immune a qualsevol bloqueig internacional de combustible nuclear, però solament un tipus de planta d'enriquiment—la centrifugació— augmenta les oportunitats de proliferació al mateix nivell que les plantes de reprocessament'.

Les proves nuclears realitzades per Pakistan, l'any 1998, són l'exemple més palès de com la tecnologia de centrifugació pot anar a parar a mans de països

que no han signat el Tractat de No-Proliferació Nuclear. La història de com va passar això és molt interessant: el Tractat d'Almelo (1970) va fer néixer Urenco, un consorci internacional d'enriquiment d'urani del qual en formaven part els governs del Regne Unit, Alemanya i Holanda, per disposar de serveis d'enriquiment que no depenguessin dels EUA. Un científic que treballava a Urenco, Abdul Qadeer Khan, va robar plànols de la planta i la llista d'uns 100 fabricants de les peces clau abans de retornar a Pakistan a mitjans dels anys 70. Així va ser possible que un país, Pakistan, disposés de tecnologia d'enriquiment. Però la història no va acabar pas aquí. L'octubre de 2003, un vaixell guardacostes italià va interceptar un vaixell de càrrega, el *BBC China*, que anava cap a Líbia. Dins el vaixell s'hi van trobar plantes completes de centrifugació. Així es va descobrir la complicada xarxa que havia muntat el pare de la bomba atòmica pakistanesa, Abdul Qadeer Khan, per proveir de tecnologia nuclear a Líbia, Corea i Iran. Khan va ser perdonat pel president pakistanès Musharraf (!), un fidel aliat del president americà Bush.

Un altre exemple és el cas de Sudàfrica, que va construir una planta d'enriquiment basada en el mètode de separació aerodinàmic. Suposadament, la planta havia de subministrar urani lleugerament enriquit per al combustible de la central nuclear de Koeberg (tecnologia francesa) i urani una mica més enriquit per al reactor de recerca Safari-I (de tecnologia americana). En realitat, la planta també va subministrar uns 400 kg d'urani enriquit al 80% per a ús militar, amb el qual es fabricaren 7 bombes atòmiques.

La capacitat d'enriquiment de les 14 plantes existents al món és suficient per alimentar el parc de reactors que avui hi ha en funcionament. Per alimentar un parc nuclear de 1.000 GW (escenari de 'creixement global') s'hauria d'incrementar entre un 120% i un 165% la capacitat actual d'enriquiment. En l'escenari de 'creixement constant' (2.500 GW) s'hauria d'incrementar entre un 450% i un 560%.

Per donar una idea de quan significant és el risc de proliferació, cal saber que només un 1% de la capacitat d'enriquiment necessària en l'escenari de 'creixement global' seria suficient per disposar d'entre 175 i 310 bombes atòmiques cada any (suposant que cadascuna tingués entre 20 i 25 kg d'urani altament enriquit).

La segona via de proliferació són les plantes de reprocessament del combustible gastat a les centrals nuclears.

El material de la primera explosió nuclear (realitzada de forma secreta el 16 de juliol de 1945 al desert d'Alamo Gordo) i la bomba atòmica que va explotar



sobre la ciutat japonesa de Nagasaki menys d'un mes després eren de plutoni, extret del combustible nuclear gastat, reprocessat a la planta de Hanford (estat de Washington). També les primeres explosions nuclears realitzades per la URSS, Gran Bretanya i França eren de plutoni.

Fins fa poc, les preocupacions referents a la proliferació es centraven en el plutoni, ja que: es necessita menys quantitat de plutoni per fer una bomba que no pas urani, el plutoni es pot produir tant en reactors de recerca com en reactors de generació d'electricitat, l'ús del plutoni permet emprar dissenys d'armes més sofisticades que s'adaptin millor als míssils que les transporten.

L'exemple de l'Índia ho deixa ben clar quan el maig de 1974 va fer explotar el seu primer giny nuclear a partir d'una bomba de plutoni. El govern havia comprat un reactor Candu (tecnologia canadenca) i a canvi del subministrament del combustible per part de Canadà s'havia compromès a no fer-lo servir per a armament nuclear. Tot i honorant aquest acord, va fer servir el reactor per irradiar urani procedent de jaciments del país. Això va ser possible perquè el reactor d'aigua pesada permet que el combustible utilitzat sigui urani natural i no pas urani enriquit. El combustible irradiat va ser reprocessat (i se'n va extreure el plutoni generat) en una planta construïda a partir dels programes de la U.S. Atomic Energy Commission, sota el paraigua dels Àtoms per a la Pau.

Als orígens de l'era nuclear era una creença comú que l'urani era un mineral escàs, i que per alimentar un parc nuclear creixent seria necessari emprar plutoni. Per això es van dedicar molts esforços de tota mena a la recerca en reactors de neutrons ràpids o també anomenats reactors. Aquests, refrigerats amb sodi líquid, empraven U-238 com a recobriment del combustible fissionable (U-235). Els neutrons produïts eren absorbits per l'U-238, que es convertia en Pu-239. Per tant, es produïa més combustible nuclear que no pas es gastava. Això almenys en teoria, ja que la pràctica ha demostrat que aquests reactors eren un estrepitós fracàs tecnològic (accidents al reactor Fermi, a prop de Chicago, l'any 1966; al reactor Monju, a la prefectura de Fukui, Japó, l'any 1995; clausura permanent del reactor Superphénix, a França, l'any 1998, després d'haver funcionat amb un factor de càrrega de només un 6,3 %).

El reprocessament comercial del combustible gastat també va experimentar dificultats: als EUA solament en va funcionar una planta (entre 1966 i 1972) localitzada a West Valley, Nova York, operada per Getty Oil. Va ser aturada per raons econòmiques, deixant un llegat de 1.000 milions de dòlars en feines de descontaminació. Després d'aquesta desastrosa experiència, el president G. Ford va declarar que els EUA no preveïen que el reprocessament fos una part essencial del cicle del combustible nuclear. A principis dels anys 80, el

president Reagan va aixecar la prohibició oficial del reproprocessament comercial, però els elevats costos de dipositar els residus en formacions geològiques profundes va fer que es mantingués, a la pràctica, la prohibició. Fins i tot l'informe de la National Energy Policy, preparat per un comitè presidit pel vice-president Dick Cheney, concluïa dient: 'Els EUA continuen descoratjant, arreu del món, l'acumulació de plutoni separat'. Però des de l'any 2005, el reproprocessament ha tornat agafar volada als EUA. La Energy Policy Act (2005) destinava fins a 580 milions de dòlars, en tres anys, a la recerca de noves tecnologies de reproprocessament i transmutació, l'anomenada Advanced Fuel Cycle Initiative. I el febrer de 2006, l'administració Bush anuncia la Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) per promoure l'expansió de l'energia nuclear arreu del món. En ella es diu: 'Els EUA i alguns socis internacionals escollits acceleraran la demostració i el desplegament de noves tecnologies de reciclatge avançades, com ara UREX+ i el pireproprocessament que reciclen el combustible nuclear de forma que no permet la separació de plutoni – un risc inherent a les tecnologies de reproprocessament actuals'.

Tot i la minsa economia del reproprocessament, a finals de 2001 hi havia acumulades arreu del món 262,5 tones de plutoni 'civil' separat (la quantitat de plutoni obtingut a les plantes americanes de Hanford i Savannah River, per a ús militar, totalitza 103,4 tn, i les de les plantes soviètiques, 150 tn). Això vol dir que la quantitat de plutoni 'civil' separat, fins a finals de 2001, és equivalent aproximadament a tot el plutoni separat per a ús militar als EUA i a la URSS. Amb aquesta quantitat de plutoni es poden fabricar més de 32.800 bombes atòmiques. La quantitat de Pu separat, cada any, a les plantes de reproprocessament en funcionament (La Hague, França; Sellafield, Regne Unit; Rokkasho i Tokai, Japó; Chelyabinsk, Rússia; Tarapur i Kalpakkan, Índia) és d'algunes tones mètriques.

Un altre problema amb les plantes de reproprocessament són els controls a base d'inventaris i la comptabilitat dels materials, degut a la possibilitat de desviament clandestí de materials. L'any 2003, el govern japonès va admetre que a la planta de reproprocessament de Tokai-mura es desconeixia on havien anat a parar 206 kg de Pu que s'havien processat, a més de 70 kg addicionals 'extraviats' a una planta de fabricació de combustible. Solament l'any 2003 i l'any 2004, la planta anglesa Thorp-Shellfield va informar que desconeixia on havien anat a parar 49 kg de Pu. I això en plantes comercials que operen en països tecnològicament sofisticats, sota els controls de l'AIEA!!! Tot plegat demostra la dificultat inherent d'intentar garantir el funcionament segur d'una planta de reproprocessament del combustible gastat procedent d'una central nuclear comercial.

Ja l'any 1977, el U.S. Congressional Office of Technological Assessment va escriure: 'El reproprocessament proveeix el vincle més fort entre l'energia nuclear comercial i la proliferació. Disposar d'una planta de reproprocessament fa que un país tingui accés al material (plutoni) desviant-lo secretament i poc a poc, de forma que sigui molt difícil de detectar... El reciclatge de plutoni és la font més probable de proveïment de material fissil per al mercat negre i de robatori per part de grups terroristes'.

Amb el fracàs dels reactors reproductors de neutrons ràpids, els defensors del plutoni es van decantar cap a l'ús de combustible nuclear a base d'òxids mixtes d'urani i de plutoni (MOX). Fins avui, només Alemanya i França han emprat combustible MOX en els seus reactors comercials. Fa tres anys, Japó va anunciar la seva voluntat de fer-ne servir a finals de la present dècada. El combustible MOX representa un gran perill pel que fa a la proliferació, ja que un simple robatori de 120 kg de combustible MOX (amb el 7 % de Pu) permetria disposar del plutoni necessari per fer una bomba de 8 kg.

Per tractar d'evitar el risc de proliferació inherent al reproprocessament del combustible gastat a les centrals nuclears en funcionament comercial que produeixen electricitat, els promotors de la nuclearització proposen tecnologies que, a primera vista, semblen més resistents a la proliferació: el procés UREX+ (modificació del procés tradicional PUREX, en el sentit que el Pu separat roman barrejat amb neptuni) i el pireprocessament (es dona forma metàl·lica al combustible gastat, que es dissol en un bany de sals, recuperant-se el Pu en uns electrodos, fent que el Pu es presenti barrejat amb altres elements transurànids i productes de fissió lantànids).

Tot i que aquestes alternatives al reproprocessament convencional podrien semblar que eviten la proliferació de Pu, encara suposen un gran risc en el cas que s'escampin arreu. Primer de tot, el material obtingut en el procés de pireprocessament pot esdevenir molt llaminer per als grups terroristes o per estats que, de forma clandestina, vulguin disposar de bombes. A més a més, el procés de pireprocessament es pot modificar ràpidament de forma que es pugui separar Pu pur. En segon lloc, el pireprocessament pot ser molt més difícil de controlar, ja que una planta d'aquestes és de grandària molt més reduïda que no pas una planta convencional, per tant el pireprocessament pot contribuir a la proliferació de la mateixa manera que ho fan les plantes d'enriquiment basades en el procés de centrifugació. I, en tercer lloc, les acumulacions de Pu ja avui existents arreu del món són objecte de molta preocupació. L'any 2001, el Japó ja disposava de 5,6 tn de Pu separat (per fer unes 700 bombes), a més de 38 tn addicionals que romanien a les plantes de

reprocessament a França i el Regne Unit (i amb el que es podrien fabricar 4.750 bombes). I el cap del partit liberal japonès ja ha manifestat que el Japó podria disposar de bombes atòmiques si es veu amenaçat pel seu veí xinès!

Fins i tot l'estudi del MIT, *The Future of Nuclear Power*, recomana que no es reprocessi el combustible gastat a les centrals nuclears comercials i que aquest s'emmagatzemi fins que no hi hagi disponible un magatzem geològic en profunditat, ja que el reprocessament, sigui quin sigui, té el risc de proliferació. Els mateixos autors de l'estudi del MIT conclouen que: 'A les properes dècades, el govern i la indústria dels EUA i d'arreu del món han de donar prioritat al desplegament del cicle del combustible obert i no pas al caríssim cicle del combustible tancat que impliqui el reprocessament i les noves tecnologies de reactors avançats i de neutrons ràpids'.

L'ús del plutoni en reactors nuclears comercials és car i posa a la humanitat davant uns riscos inacceptables de proliferació d'armes nuclears. Pel que fa a les piles de plutoni, tant militar com 'civil', avui existents, s'han de posar ràpidament sota supervisió internacional per reduir la possibilitat de desviament, i s'han de convertir en una forma escaient per ser dipositades de forma permanent.

Voler confiar en l'energia nuclear per combatre l'escalfament global del planeta degut a la crema dels combustibles fòssils, a part de no resoldre el problema, també voldria dir fer unes enormes inversions, donat que el cost d'instal·lació de centrals nuclears pot ser superior a 2.000 \$/kW. L'esmentat estudi del MIT cita la xifra dels 2.000 \$/kW per la nuclear, mentre que per centrals tèrmiques de carbó dona la xifra de 1.300 \$/kW i per les centrals de cicle combinat de gas la de 500 \$/kW, cosa que converteix l'electricitat d'origen nuclear en la més cara de totes (6,7 \$cents/kWh), en front a les seves competidores en la generació centralitzada (4,2 \$cents/kWh pel carbó i entre 3,8 i 5,6 \$cents/kWh pel gas). I si ho comparem amb les seves reals competidores descentralitzades en el mercat energètic avui existent, aleshores la nuclear encara en surt més malparada.

Construir milers de reactors voldria dir unes inversions enormes (trilions de dòlars). Des del punt de mira estrictament energètic i econòmic, hi ha alternatives molt més eficients pel que fa a l'escalfament del planeta (la generació distribuïda).

Per una altra part, hi ha qui confia en l'anomenada fusió nuclear. Actualment, la fusió nuclear pot ser considerada com la font d'energia més sofisticada, a més de ser una de les que s'hi dedica més esforç científic. Evidentment, és la font d'energia més complicada, tan complicada que, fins ara, mai ningú no ha estat capaç de demostrar la seva viabilitat, ni tan sols a nivell experimental.

El principi de la fusió nuclear és molt senzill. En comptes de trencar àtoms pesants (això és la fissió nuclear) ara es tracta d'ajuntar àtoms lleugers. Tant en un cas com en l'altre hi ha un gran alliberament d'energia degut a la pèrdua de massa (1gr. de massa convertit en energia equival a l'energia alliberada per 22.000 tn de TNT quan explota, 1 tn TNT equival a  $4,1 \cdot 10^9$  Jouls).

En tenir els nuclis dels àtoms dels elements lleugers càrrega elèctrica positiva, cal vèncer grans forces de repulsió electrostàtica (la barrera de Coulomb) per aconseguir el seu apropament i la seva fusió, donant com a resultat un nucli menys pesant que cadascun dels nuclis fusionats. La millor forma d'assolir-ho és 'escalfant', és a dir, per agitació tèrmica; per això s'anomena fusió termonuclear. Però les temperatures necessàries són de l'ordre de desenes i centenars de milions de graus: la fusió deuteri-triti requereix una temperatura de  $45 \cdot 10^6$  de graus, i la fusió deuteri-deuteri requereix una temperatura de  $400 \cdot 10^6$  graus.

Amb aquestes grans temperatures comencen les dificultats, ja que només s'assoleixen de forma natural als estels (en el Sol, la fusió protó-protó es realitza a una temperatura de  $15 \cdot 10^6$  de graus, més baixa degut a l'elevada densitat i l'alta població de partícules) i de forma artificial al cor d'una explosió nuclear. La realitat, ara per ara, és que l'únic exemple reeixit de l'energia termonuclear és l'explosió de la bomba d'hidrogen!, en la qual s'assoleix la temperatura necessària fent explotar prèviament una bomba atòmica d'U-235 o de Pu-239!

Per altra banda, cal considerar que les temperatures més altes assolides amb normalitat a la Terra mai no han sobrepassat els 5.000 graus centígrads (i s'assoleixen amb energies renovables!, concentrant els raigs del Sol amb enginyers concentradors solars, com el Forn Solar d'Odeillo, a la Cerdanya Francesa, en funcionament des de fa moltes dècades).

A més de la temperatura, hi ha altres paràmetres importants que juguen un paper clau en la física de la fusió nuclear: per una part, la densitat de les partícules que reaccionen en el plasma ( $n$ ) i, per l'altra, el temps de confinament ( $t$ ), temps durant el qual la reacció pot ser mantinguda abans que els productes es dispersin. L'any 1957, el físic britànic Lawson va enunciar el seu conegut criteri que regeix els mecanismes de la fusió nuclear: el producte de la densitat de partícules ( $n$ ), pel temps de confinament ( $t$ ) ha de ser superior a un valor donat (per la fusió deuteri-triti ha de ser superior a  $10^{14}$  seg/cm<sup>3</sup> i per la fusió deuteri-deuteri ha de ser superior a  $10^{16}$  seg/cm<sup>3</sup>).

Però, s'han assolit mai alguns o tots aquests paràmetres bàsics en algun dels artefactes emprats en la recerca experimental de la fusió nuclear? Des de l'any 1991, s'han produït de forma controlada alguns MW d'energia de fusió en

experiments amb la reacció deuteri-triti, realitzats al JET (Joint European Torus) i al TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor). L'any 1997, al JET es varen assolir 12 MW amb un pic de 16,1 MW, tot i que per arribar a les temperatures necessàries s'havia hagut d'alimentar l'experiment amb 25,7 MW. De forma estacionària, en el JET s'ha assolit més de 5 MW durant 5 segons, amb una producció d'energia de 22 MJ. Es va necessitar una potència de 24 MW per subministrar una energia d'escalfament de 120 MJ. El controvertit projecte de l'ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) pretén ser la continuació de tots aquests enginyers.

Ara bé, per a què un reactor de fusió generi més energia que la que consumeix, el plasma hauria de romandre confinat ben clarament en alguna part material del reactor durant almenys dos segons a 150 milions de graus centígrads i a una densitat de  $2 \cdot 10^{14}$  partícules per centímetre cúbic. Aquesta és la concreció de l'esmentat criteri de Lawson per la reacció deuteri-triti. Es pot concloure que s'està encara lluny d'assolir-lo, és a dir, de demostrar la viabilitat de la fusió nuclear.

Els físics nuclears que treballaven en aquests projectes, optimistes per naturalesa, manifestaven que a començaments del segle XXI podrien construir un reactor experimental de fusió i que si tenien resultats exitosos, aleshores i només aleshores es podria construir un prototipus de demostració de reactor de fusió termonuclear. Això es podria assolir, segons els més optimistes, a finals de la primera quarta part del segle XXI. Només llavors serà possible de fer una valoració tècnico-econòmica, és a dir, comercial, d'aquesta nova font d'energia. Els més optimistes afirmen que l'any 2047 es podria iniciar la construcció del primer reactor de fusió nuclear comercial, que estaria acabat l'any 2055.

En el marc d'aquest objectiu s'inscriu el projecte ITER, que són les sigles en anglès de Reactor Termonuclear Experimental Internacional. Sota aquestes sigles s'aplega un caríssim programa de recerca internacional per demostrar la viabilitat científica i tecnològica de la fusió nuclear. Alhora, aquest experiment vol proporcionar la informació científica i tecnològica necessària per al desenvolupament d'un reactor de fusió nuclear de demostració (anomenat DEMO).

L'ITER no és més que un projecte per realitzar un experiment que pretén fer durar la fusió durant uns 100 segons per permetre que les partícules d'heli, resultants de la reacció de fusió, siguin la font dominant de calor i que la potència de fusió sigui de l'ordre de 100 MW. Avui ni tan sols se sap si es podrà fer funcionar de forma continua. Un dels objectius de l'ITER és aprendre a controlar el cicle del triti.

L'ITER serà una instal·lació experimental que portarà associada una descomunal inversió (o un enorme malbaratament, segons com es miri). Primer es va anunciar una quantitat de 3.700 milions d'euros en deu anys i posteriorment s'ha augmentat fins a 4.500 milions (3.500 milions per a la construcció al llarg de 10 anys, més 700 milions de costos associats), a més a més d'uns costos d'operació d'uns 220 milions durant 20 anys). A Europa, el *lobby* polític-tecno-científic favorable a la fusió s'agrupa avui dins d'EURATOM –el tractat europeu de l'energia atòmica que va néixer per difondre l'energia nuclear arreu d'Europa, a l'ombra del programa Àtoms per a la Pau promogut pels EUA a començament dels anys 50– que, juntament amb la CECA (Comunitat Europea de Carbó i l'Acer), avui ja inexistent, foren els dos instruments entorn els quals va néixer la Unió Europea actual. El Tractat d'EURATOM és avui molt qüestionat a nivell europeu, de manera que es proposa des de la seva abolició fins a la seva profunda revisió, perquè deixi de fer tasques de promoció de l'energia nuclear i es centri estrictament en qüestions de seguretat nuclear.

Ens podríem preguntar si aquesta forma de gastar els diners en un projecte que ni tan sols es pot preveure si mai donarà resultats comercials, és la millor forma de dedicar recursos públics a projectes energètics quan, per exemple, a les energies renovables, que són una realitat molt més propera, s'hi destinen unes quantitats molt i molt inferiors que les dedicades a la recerca nuclear.

Els defensors de la fusió nuclear manifesten que aquesta tecnologia no té implicacions militars. Ara bé, com que la fusió requereix la manipulació de triti (un isòtop de l'hidrogen que no existeix de forma natural a la biosfera), en dominar aquesta tecnologia s'obre la porta a un altre aspecte de la proliferació: l'ús del triti per augmentar l'efectivitat d'un giny nuclear, tenint en compte que el triti es produirà en la coberta de liti d'un reactor nuclear de fusió, si es que mai se'n arriba a fer funcionar cap.

L'any 2001, el U.S.DOE va publicar el *Draft Environmental Impact Assessment for the Sitting Construction and Operation of New Production Reactor Capacity*. En aquest informe es pot llegir: 'L'ús del triti en armes nuclears fa que sigui possible fer-les més petites, encara que més potents, i també fa que es redueixi la quantitat de plutoni necessari per cada bomba'.

L'ús del triti en el disseny de bombes atòmiques és el primer pas per passar de les bombes de fissió a les termonuclears (de fusió o també anomenades bombes d'hidrogen), milers de vegades més potents que les de fissió.

Els cas dels EUA és ben paradigmàtic en aquest aspecte: gairebé tot el triti que conté l'arsenal nuclear americà prové dels reactors del complex militar de Savannah River Site – SRS (Carolina del Sud). Des que es va aturar el reactor

K del SRS, l'any 1993, destinat a la producció de triti, els EUA han estat reciclant el triti de l'armament que s'anava desballestant. Però com que el triti és un emissor de radiació Beta de 12,36 anys de període de semi-desintegració, això fa que es desintegri i perdi efectivitat (un 5,5 % cada any), creant la necessitat de renovar el triti contingut als ginys nuclears actius. El 6 de maig de 1999, el secretari d'Energia americà, Bill Richardson, va anunciar que els reactors nuclears de *Watts Bar* i de *Sequoyah*, de generació comercial d'electricitat, propietat de la TVA (Tennessee Valley Authority, una empresa propietat del govern federal), serien modificats pel DOE per a la producció de triti destinat a l'arsenal nuclear militar. El consell d'administració de la TVA ho va aprovar el desembre de 1999 i la U.S.NRC (Nuclear Regulatory Commission) va autoritzar el setembre de 2002 la modificació de l'autorització de les centrals nuclears *Watts Bar* i *Sequoyah* 1 i 2 per a la producció de triti. El 20 d'octubre de 2003, oficialment els reactors varen començar a produir triti per a bombes atòmiques. El triti s'obté a partir d'irradiar barres de liti inserides en el nucli dels reactors. Passats 18 mesos dins el nucli del reactor, les barres irradiades s'extreuen i són retornades al DOE per ser reprocessades a la planta de Savannah River Site per obtenir el triti.

L'actual política de triti als EUA simplement esborra, de cop, la frontera entre el nuclear 'civil' i el nuclear militar, si és que mai ha existit tal frontera. A més, el missatge que envia cap a altres països és ben evident: reactors nuclears comercials de generació d'electricitat, propietat de l'estat, poden produir, a més a més de plutoni, triti per augmentar l'efectivitat de l'armament nuclear.

Algú encara es creu que la nuclear és per produir electricitat?